

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.417

준 능동형 로터를 이용한 마이크로 혼합기의 제작 및 혼합특성

김용대* · 이종광* · 권세진†

(2008년 8월 6일 접수, 2008년 11월 25일 수정, 2009년 1월 29일 심사완료)

Fabrication and Mixing Characteristics of a Micro-Mixer with a Quasi-Active Rotor

Youngdae Kim, Jongkwang Lee and Sejin Kwon

Key Words : Micro Mixer(마이크로 혼합기), Micro Rotor(마이크로 로터), Photosensitive Glass(감광 유리), Rotor Mixer(로터 혼합기)

Abstract

A micro-mixer with a quasi-active rotor was fabricated, and mixing characteristics were evaluated. The proposed micro-mixer combines an active type micro-mixer with a passive type micro-mixer. The micro-rotor, which is a moving part of an active type micro-mixer, is added in a micro-chamber of a passive type vortex micro-mixer. The rotor rotated by inflows tangent to a chamber, causing strong perturbations. The micro-mixers were fabricated using photosensitive glass. Mixing efficiency of the micro-mixers was measured using an image analysis method. Mixing efficiency and characteristics of the micro-rotor mixer were compared with the vortex micro-mixer without a rotor. Mixing efficiency was reduced as Reynolds number increased at a low Reynolds number due to decrease of residence time. Mixing efficiency at higher Reynolds number, on the other hand, was improved even though residence time decreased since the contact surface between fluids increased by twisted flow. The perturbation induced by rotating rotor at greater than Re 200 improved the efficiency of the rotor mixer.

1. 서론

최근 다양한 분야에서 MEMS 기술을 이용한 마이크로 시스템을 개발하고 있다. 특히, 상업적 이용과 관련하여 생화학 분야에서 그 응용이 활발한데, μ -TAS(Micro Total Analysis System), LOC(Lab-on-a-chip system), 마이크로 플랜트가 그 대표적인 응용 시스템이다.⁽¹⁻³⁾ 이중 마이크로 플랜트는 마이크로 가공 기술을 이용해 기존의 거대한 화학 공장을 소형화시킨 화학 플랜트이다. 최근 화학 산업에서는 고품질, 고부가가치의 생산물을 짧은 시간 안에 개발하고 생산하는 쪽으로 연구 초점이 맞춰지고 있다. 이와 같은 고품질, 고부가가치의

생산물을 생산하기 위해서는 온도, 압력, 혼합 등을 정밀하고 균일하게 제어해야 한다. 하지만 기존의 대규모 화학 플랜트에서는 많은 양의 반응물을 한꺼번에 반응시키기 때문에 위와 같은 변수들을 전체 반응물에 정밀하고 균일하게 맞춰줄 수 없다. 반면에 마이크로 플랜트는 내부 공간의 크기가 작기 때문에 비표면적이 커지게 되고, 열 및 물질 전달이 잘 일어나 보다 균일한 상태에서 반응이 일어날 수 있도록 해준다. 또한 유동 간 접촉 면적이 넓기 때문에 반응률이 향상되고, 수율이 증가하게 된다. 이는 원료의 손실을 감소시켜 경제적인 면에서 기존의 거대 화학 공장보다 유리하다. 특히 마이크로 플랜트 내부 유동은 레이놀즈 수가 작아 층류 유동이 발생되어 정밀한 유동 제어를 가능하게 한다.⁽⁴⁻⁶⁾

마이크로 플랜트는 일반적으로 ml/h ~ l/h의 유량으로 운영되며,⁽⁷⁾ 마이크로 열교환기, 마이크로 반응기, 마이크로 혼합기로 구성되어 있다. 마이크로

† 책임저자, 회원, KAIST 항공우주공학전공

E-mail : melody@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3721 FAX : (042)869-3710

* 회원, KAIST 항공우주공학전공

혼합기는 크게 수동형 혼합기와 능동형 혼합기로 구분할 수 있다. 수동형 혼합기는 마이크로 채널 또는 마이크로 챔버 내부에 미세구조물을 배치시켜 혼합을 유도하는 혼합기이다. 수동형 혼합기는 주입 에너지에 의해 작동을 하기 때문에 외부의 추가적인 장치가 필요하지 않아 다른 마이크로 플랫폼 구성요소와 통합이 용이하며, 제작이 쉽다는 장점이 있다. 하지만 능동형 혼합기에 비해 강한 교란을 기대할 수 없기 때문에 혼합성능을 향상시키기 위해 많은 미세구조물을 배치하거나, 유로의 폭을 작게 하여 확산 거리를 감소시켜야 하기 때문에 압력강하가 커지게 된다.

능동형 혼합기는 외부의 추가적인 에너지에 의해 발생한 강한 교란을 이용하는 혼합기다. 능동형 혼합기는 강한 교란에 의해 혼합성능이 향상될 수 있으나, 주입 에너지 이외의 추가적인 에너지가 필요하기 때문에 구조가 복잡하고 제작이 어려우며, 추가적인 장치가 필요하기 때문에 다른 마이크로 장치와의 통합성이 떨어진다는 단점이 있다.

수동형 혼합기는 확산을 이용하는 혼합기와 대류를 이용하는 혼합기로 나뉜다. Hessel 등은 두 유동을 여러 개의 작은 유동으로 나눈 후 이를 교차해서 공급해줌으로써 확산 거리를 감소시키고 균일한 혼합이 이루어지도록 했다.⁽⁸⁾ 이 등은 기존 다적층 혼합기에 다이아몬드 형태의 재순환 공간을 도입함으로써 와류를 발생시키고, 이 와류에 의해 대류 혼합이 발생하는 혼합기를 제안하였다.⁽⁹⁾ Stroock 등은 마이크로 유로 바닥의 비스듬한 홈을 형성하여 3 차원의 나선형 카오스 유동을 발생시켰다.⁽¹⁰⁾ Lin 등은 두 유동을 8 갈래로 분리한 후 이를 원형 챔버에 주입함으로써 챔버 내부에 와류를 발생시키는 혼합기를 제안하였다.⁽¹¹⁾

수동형 혼합기 외에 능동형 혼합기에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. Oddy 등은 유로 내부의 전기장을 변화 시킴으로써 강한 교란을 발생시켰다.⁽¹²⁾ Liu 등은 공기방울을 액추에이터로 활용하여 유체를 혼합하는 연구를 하였다.⁽¹³⁾ Ryu 등은 미세 자기 막대를 채널 내에 장착하고, 외부에서 자기 교반 장치로 자기 막대를 회전 시킴으로써 혼합을 유도한 능동형 혼합기를 제안하였다.⁽¹⁴⁾

마이크로 혼합기는 마이크로 플랫폼의 한 구성 요소로서 혼합성능뿐만 아니라 각 장치들과의 통합성을 고려해서 제작해야 한다. 따라서 상용화된 대부분의 마이크로 혼합기는 주입 에너지만으로 작동하는 수동형 혼합기가 대부분이다.^(15,16) 하지

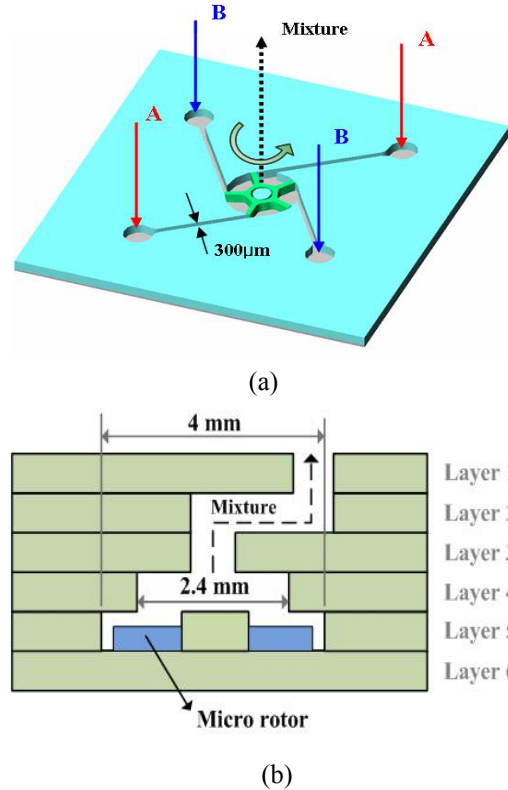


Fig. 1 (a) Schematic of micro-rotor mixer, (b) cross section of each chamber

만 수동형 혼합기는 강한 교란을 기대할 수 없기 때문에 능동형 혼합기에 비해 혼합성능이 낮다는 단점이 있다. 이 연구에서는 다른 장치들과의 통합성이 우수한 수동형 혼합기의 형태에 능동형 혼합기의 움직이는 요소를 도입하고자 한다. 이를 위해 수동형 혼합기의 내부에 유동의 주입 에너지에 의해 회전하는 마이크로 로터를 장착하였다. 이 로터에 의해 챔버 내부에 강한 교란이 발생하여 카오스 혼합이 이루어진다. 카오스 혼합은 비정상 유동에 의한 혼합을 말하며,⁽¹⁷⁾ 로터 혼합기에서는 로터가 회전하면서 비정상유동이 발생한다.

2. 마이크로 혼합기의 설계 및 제작

2.1 마이크로 로터 혼합기 설계

Fig. 1 (a), (b)는 각각 로터 혼합기의 개략도와 단면을 보여주고 있다. 총 6 개 층으로 이루어져 있으며, 두 종류의 유동이 각각 2 갈래로 나뉘어 총 4 갈래의 유동이 5 번째 층의 원형 챔버에 접하여 교차주입되면 이

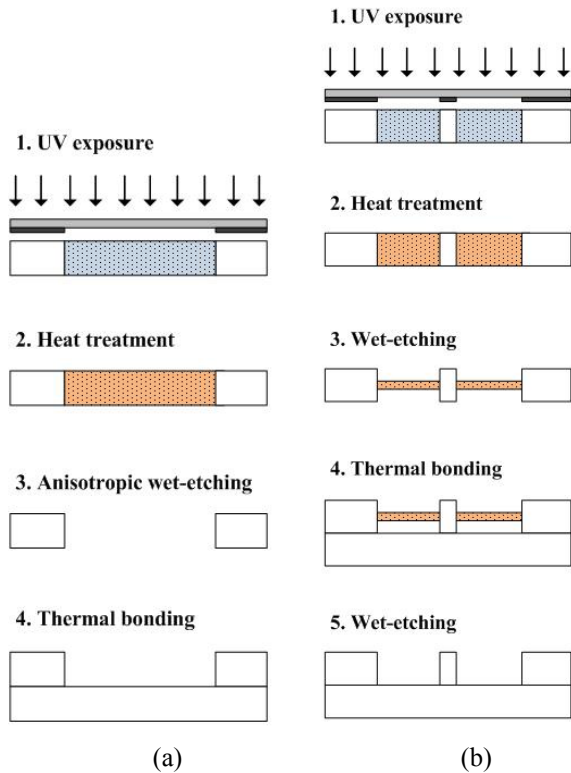


Fig. 2 Fabrication process of photosensitive glass (a) conventional fabrication process, (b) fabrication process for pillar

유동에 의해 마이크로 로터가 회전을 하는 구조이다. 로터 혼합기의 치수는 감광유리의 가공 한계를 고려함과 동시에 마이크로 플랜트의 유량대인 ml/h ~ l/h 영역에서 출구 채널의 레이놀즈 수가 10 ~ 1000 사이의 값을 가지도록 결정하였다. Fig. 1(a)에서 챔버로 유입되는 채널의 폭과 높이는 각각 300 μ m, 700 μ m 로 결정하였다. Fig. 1(b)에서 5 번째 층의 원형 챔버, 기둥, 로터의 지름은 각각 4 mm, 1.2 mm, 3.9 mm, 로터의 높이는 500 μ m 로 결정하였다. 로터가 이탈되는 것을 방지하기 위해 4 번째 층에 지름 2.4 mm, 두께 700 μ m 의 원형 챔버를 형성하였다.

2.2 혼합기의 제작

로터 혼합기는 Fig. 2 와 같이 감광유리 습식식각 공정을 이용해 6 층의 감광유리를 각각 가공한 후 열접합하여 제작하였다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 기둥이 형성된 5 번째 층을 제외한 다른 층과 로터는 Fig. 2(a)와 같이 일반적인 감광유리 가공공정을 이용해 제작하였다. 먼저 감광유리를 310 nm파장의 자외선에 노광을 한 후 585 $^{\circ}$ C의 고온에서 열처리를 거치면 자외선에 노출된 부분이 결정화 된다. 이렇게

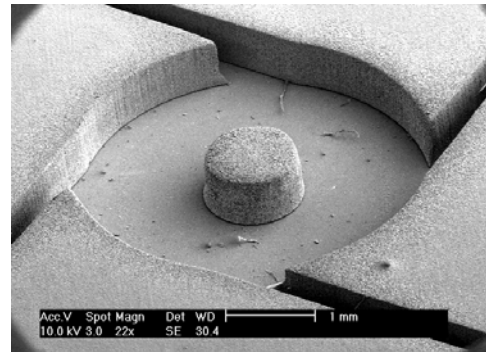


Fig. 3 Detailed view of pillar

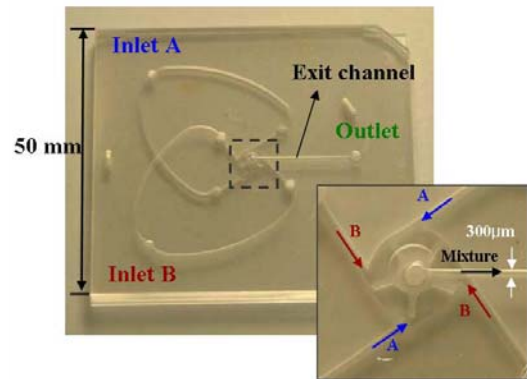


Fig. 4 Fabricated micro-rotor mixer

결정화 된 부분은 결정화가 이루어지지 않은 부분에 비해 불산 용액에서 식각률이 매우 높다. 이 연구에서는 10% 불산 용액에서 식각을 하였다. 이후 식각된 각 층들을 500 $^{\circ}$ C에서 열접합 하였다. Fig. 2(b)는 기둥 제작공정을 보여주고 있다. Fig. 2(a)의 제작공정과 마찬가지로 자외선을 노광하고 열처리를 한 다음 불산 용액에서 약 100 ~ 200 μ m 두께의 박막이 형성될 때까지 식각을 한다. 이후 바닥 층과 열접합을 하고 나머지 박막 부분을 식각하여 기둥을 형성하였다. 기둥의 크기가 작아서 핸들링이 어렵기 때문에 기둥 층을 바닥 층과 접합을 한 후 노광된 부분을 식각하였다. 제작된 기둥은 Fig. 3 과 같다. 이후 로터를 혼합기에 장착하고 각 층을 열 접합함으로써 최종적인 마이크로 혼합기를 제작할 수 있다. Fig. 4 는 제작된 마이크로 로터 혼합기이다.

3. 마이크로 혼합기의 성능 평가

일반적으로 혼합성능 평가 방법은 염료를 이용

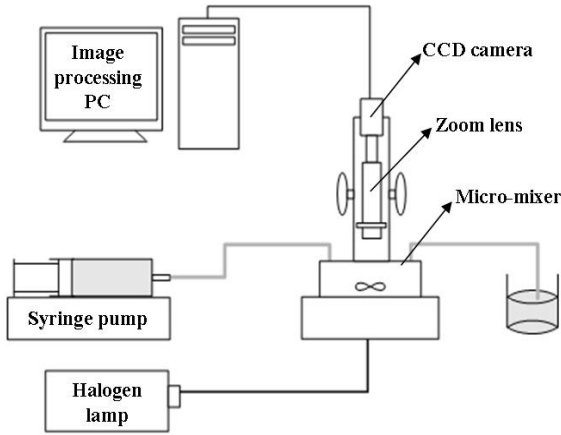


Fig. 5 Experimental set-up

이용하는 방법과 화학반응을 이용하는 방법이 있다. 화학반응을 이용하는 방법에는 크게 두 가지 방법이 있다. 먼저 경쟁반응을 일으키는 염산과 요오드 화합물을 혼합한 후 생성되는 요오드의 자외선 흡수율을 측정함으로써 혼합성능을 평가하는 방법이 있고, 두 번째로 Ph지시약과 강염기 용액을 혼합한 후 Ph 지시약의 색상강도를 분석함으로써 혼합성능을 평가하는 방법이 있다. 하지만 화학반응을 이용할 경우 반응시간과 유동 잔류시간의 관계를 고려해야 한다.^(21,22) 반면에 염료를 이용한 방법은 화학반응이 일어나지 않기 때문에 확산 및 대류에 의한 혼합성능을 효과적으로 평가할 수 있다. 이 논문에서는 화학반응을 배제하고 확산 및 대류에 의한 혼합만을 평가하기 위해 염료를 이용하여 실험을 실시하였다.

Fig. 5 는 혼합성능 평가 장치의 개략도를 보여주고 있다. 먼저 주사기 펌프 (KDS200, KD Scientific)로 같은 유량의 검정색 잉크와 물을 주입하였다. 이때 유량은 마이크로 플랜트의 유량 범위인 10.35 ~ 1035 ml/h 이었으며, 이에 해당하는 레이놀즈 수는 10 에서 1000 사이의 값을 가진다. 이후 CCD 카메라 (MARLIN F-080C, ALLIED Vision Technologies) 와 초고속 카메라 (X-Stream XS-3, IDT)를 이용해 출구채널과 챔버 내부의 혼합영상을 획득하였다.

이미지 분석 소프트웨어 (NI vision assistance, National Instruments)와 식 (1)과 (2)를 이용해 색상강도를 분석하였다.⁽⁹⁾

$$I_{nor,i} = \frac{I_{water,i} - I_i}{I_{water,i} - I_{ink,i}} \quad (1)$$

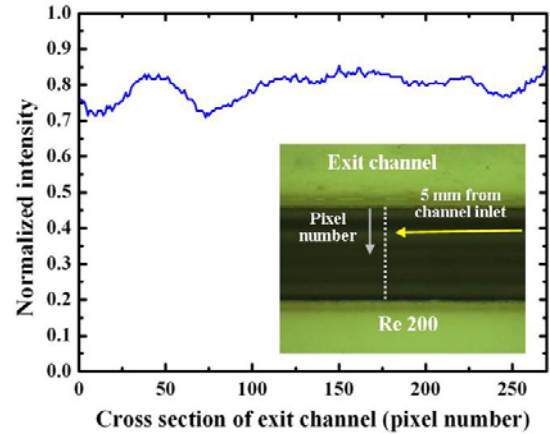


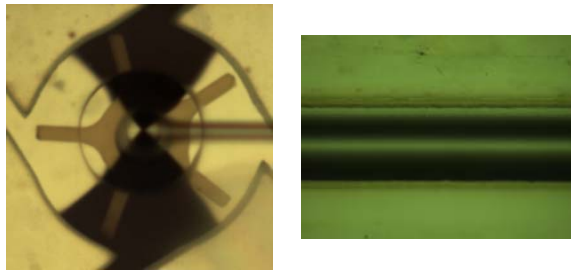
Fig. 6 Calculation of normalized intensity

$$\eta = \left[1 - 2 \times \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum (I_{nor,i} - I_{nor,avg})^2 \right)} \right] \times 100 \quad (2)$$

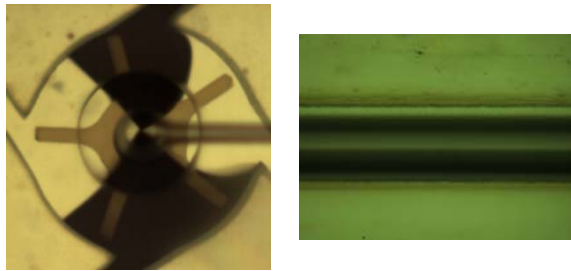
이 식에서 I_i 는 물과 잉크가 혼합되었을 때 i 번째 픽셀의 색상강도를 나타낸다. 이 때 I_i 는 물만 주입하였을 때 i 번째 픽셀의 색상강도 $I_{water,i}$ 와 잉크만 주입하였을 때 i 번째 픽셀의 색상강도 $I_{ink,i}$ 사이의 값을 가진다. 따라서 I_i 를 $I_{water,i}$ 와 $I_{ink,i}$ 로 정규화를 하였다. 이후 정규화된 색상강도 $I_{nor,i}$ 의 표준편차를 계산함으로써 혼합효율을 평가할 수 있다. 식 (2)에서 N 은 전체 픽셀의 수이며, $I_{nor,avg}$ 는 정규화된 색상강도의 평균값이다.

Fig. 6 은 레이놀즈 수 200 에서 출구채널의 정규화된 색상강도 그래프와 출구채널의 혼합영상을 보여주고 있다. 이 논문에서는 정규화된 색상강도의 표준편차를 계산하여 혼합성능을 평가하였다. 균일한 혼합이 이루어지면 색상강도의 편차가 작고, 불균일한 혼합이 이루어지면 색상강도 편차가 크다. 이러한 특성을 이용해 정규화된 색상강도의 표준 편차를 구함으로써 혼합성능을 비교할 수 있다. 색상강도 분석 위치는 출구채널의 입구에서 5 mm 떨어진 지점이다. 이는 출구채널로 유입된 유동의 완전 발달 거리를 감안한 것이다.

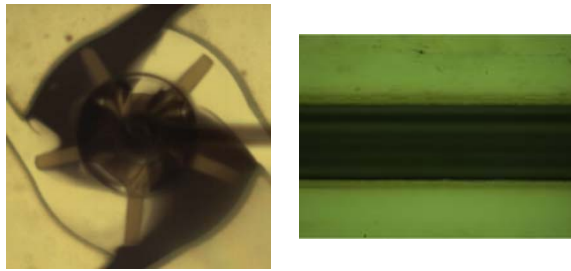
초고속 카메라를 이용해 챔버 내부 유동을 촬영함으로써 유동 및 혼합 특성을 분석하고, 로터의 회전속도를 측정하였다. aliasing 현상을 피하기 위해 로터 회전 속도보다 최소 40 배 이상의 속도로 촬영을 한 후 각 프레임에서 로터의 위치를 분석함으로써 회전속도를 계산할 수 있다.



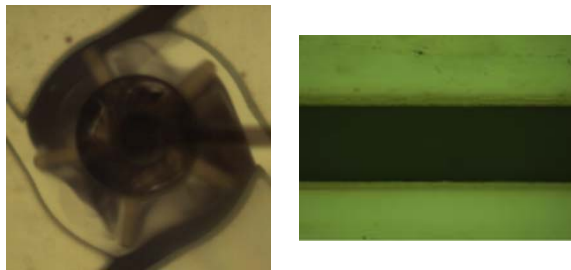
(a)



(b)

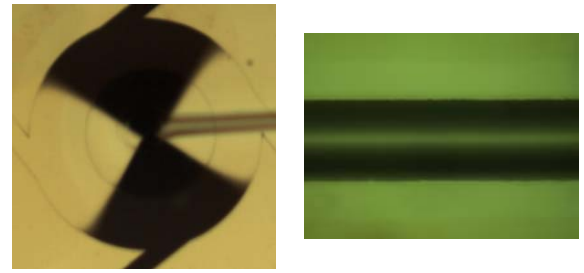


(c)

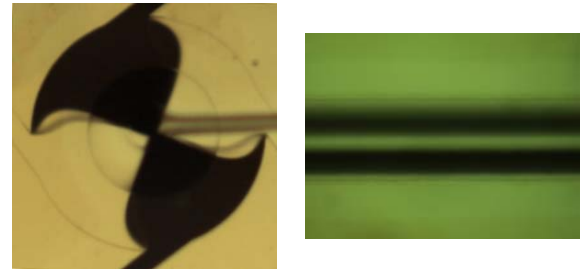


(d)

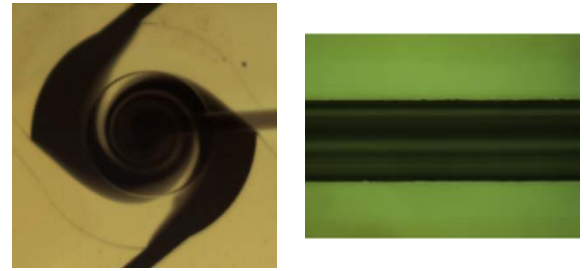
Fig. 7 Flow patterns of rotor mixer (a) Re 10, (b) 40, (c) 200, (d) 800



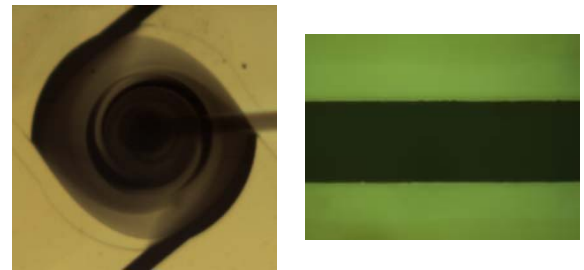
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Flow patterns of vortex mixer (a) Re 10, (b) 40, (c) 200, (d) 800

4. 성능 평가 결과 및 고찰

로터 혼합기와 기존 와류 혼합기의 혼합효율 및 유동 특성을 비교하였다. 와류 혼합기는 로터 혼합기에서 로터가 제거된 형태이며, 감광유리를 이용해 제작 하였다.

Fig. 7, 8 은 각각 로터 혼합기와 와류 혼합기의 챔버 내부 및 출구채널의 혼합영상을 보여주고 있다. Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)는 레이놀즈 수 10 에서

로터 혼합기와 와류혼합기의 챔버 내부 유동을 보여주고 있다. 이 영역에서는 대류 강도가 약하기 때문에 유동의 비틀림 현상이 나타나지 않는다. 따라서 대류에 의한 혼합보다는 확산에 의한 혼합이 지배적으로 나타난다. Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)는 레이놀즈 수 40 에서 유동형상을 보여주고 있다. 이 영역에서는 챔버 내부의 대류 강도가 강해지기 때문에 유동의 비틀림 현상이 나타난다. 따라서 유동간 접촉 면적이 증가하기 시작한다. 레이놀즈 수 200 이상에서 로터가 회전하기 시작했으며 Fig.

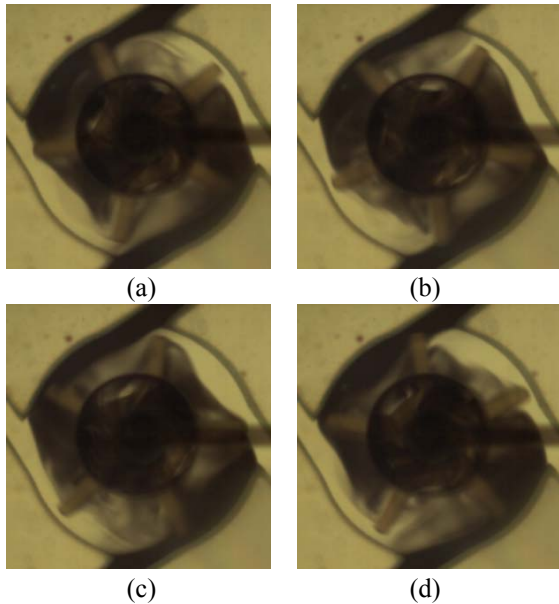


Fig. 9 Flow patterns of chamber of rotor mixer at Re 800 (a) 0.3 msec, (b) 0.6 msec, (c) 0.9 msec, (d) 1.2 msec)

7 (c), (d)와 같이 챔버 내부에 강한 교란이 발생한다. Fig. 9 는 로터가 회전할 때 시간에 따른 챔버 내부 유동을 보여주고 있다. 로터가 회전함으로써 챔버 내부에 비정상유동이 형성되어 카오스 혼합이 이루어진다. 이 카오스 혼합에 의해 유동 간 접촉면적이 증가하고 확산거리가 감소한다. 와류 혼합기에서는 Fig. 8 (c), (d)와 같이 레이놀즈 수가 증가함에 따라 와류가 발생한다. Fig. 7(c)와 Fig. 8(c)의 출구채널 혼합영상을 보면 레이놀즈 수 200 에서 로터 혼합기의 혼합성능이 와류 혼합기에 비해 향상되었다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10 은 로터 혼합기와 와류 혼합기의 혼합효율을 나타낸 그래프이다. 레이놀즈 수 40 이상에서 전반적으로 로터 혼합기의 성능이 와류 혼합기의 성능보다 향상된 것을 볼 수 있다. 로터 혼합기에서 레이놀즈 수 20 까지는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합성능이 감소하였다. 이러한 경향은 와류 혼합기에서도 나타난다. 와류 혼합기에서는 레이놀즈 수 40 이하에서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합성능이 감소한다. 혼합은 유동 사이의 계면에서 이루어지기 때문에 유동간 접촉면적이 증가하거나, 브라운 운동에 관한 식 (3)과 같이 유동간 접촉 시간이 길어지면 성능이 향상된다.⁽²³⁾

$$\lambda = \sqrt{2Dt} \quad (3)$$

식 (3)에서 λ 는 분자가 확산된 평균거리, t 는 확산시간, D 는 확산계수이다. 로터 혼합기와 와류 혼합기에서 낮은 레이놀즈 수 영역에서는

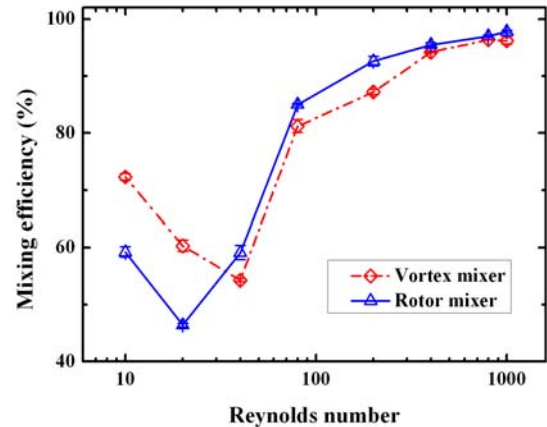


Fig. 10 Mixing efficiency as a function of Reynolds number

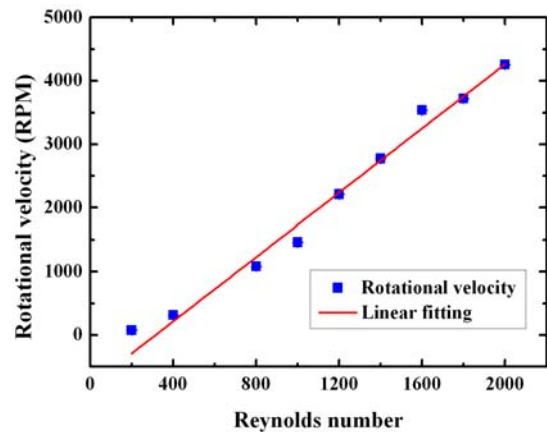


Fig. 11 Rotational velocity of rotor mixer

레이놀즈 수가 증가해도 유동간 접촉 면적은 크게 변하지 않지만, 유동의 잔류 시간은 감소하게 된다. 따라서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합성능이 감소한다.

레이놀즈 수가 더 증가를 하게 되면 대류강도가 강해져 내부 유동에 비틀림 현상이 발생한다. 이 영역에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 더 강한 비틀림이 발생을 하고 유동간 접촉 면적이 증가한다. 따라서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 유동의 잔류시간이 감소함에도 불구하고 혼합성능이 향상된다.

레이놀즈 수 200 이상에서 로터 혼합기의 로터가 회전을 하기 시작한다. 이 때 혼합성능은 93%의 값을 가지며, 이 값은 기존 와류 혼합기의 혼합성능보다 약 10% 향상된 값이다. 레이놀즈 수 200 에서 유량은 약 200 ml/h 가 된다.

로터가 회전을 하게 되면 Fig. 7 (c), (d)와 같이 강한 교란이 발생하게 되어 유동간 접촉 면적이 증가를 하고, 확산거리가 짧아진다. 식 (3)에서 확산거리 λ 가 작아지면 그만큼 혼합에 필요한 시간

t 가 짧아진다. 따라서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 유동이 혼합기 내에 머무는 잔류시간이 감소하지만 혼합성능은 향상된다.

로터 혼합기의 회전속도를 측정한 결과는 Fig. 11 과 같다. 레이놀즈 수 200 에서 회전속도는 75 rpm 이었으며, 레이놀즈 수 2000 에서는 4255 rpm 의 회전속도를 가졌다. 로터의 회전속도를 측정한 결과 레이놀즈 수에 선형적으로 비례하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 수동형 혼합기에 로터를 도입한 새로운 마이크로 혼합기의 개념을 제시하였고, 로터 혼합기의 성능을 실험을 통해 평가하였다. 염료를 이용하여 로터 혼합기의 성능시험을 한 결과 레이놀즈 수 40 이상에서는 전반적으로 로터 혼합기의 혼합효율이 와류 혼합기의 혼합효율보다 높은 값을 가졌다. 낮은 레이놀즈 수 구간에서는 두 혼합기 모두 유동의 비틀림이 발생하지 않는다. 따라서 레이놀즈 수가 증가하여도 유동간 접촉면적은 크게 변하지 않지만 잔류시간이 감소하기 때문에 혼합성능이 감소하게 된다. 이 영역을 지나게 되면 혼합기 내부에 비틀림 현상이 나타난다. 이 구간에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 비틀림 강도가 강해지고 유동간 접촉면적이 증가한다. 따라서 잔류시간이 감소함에도 불구하고 혼합성능은 향상된다.

로터가 장착되지 않은 와류 혼합기에서도 유사한 경향이 나타난다. 낮은 레이놀즈 수 영역에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합성능이 감소하지만 일정 레이놀즈 수 이상에서는 챔버 내부에 비틀림 현상이 나타나고, 유동간 접촉면적이 증가하기 시작한다. 이 구간에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합성능이 향상된다.

로터 혼합기에서는 레이놀즈 수 200 이상에서 로터가 회전을 하기 시작한다. 로터가 회전을 하게 되면 강한 교란이 발생하여 혼합효율이 향상된다. 이 때 혼합효율은 와류 혼합기의 혼합효율보다 약 10% 높은 값을 가진다. 로터가 회전할 경우 90% 이상의 혼합효율을 가지며, 로터의 회전속도는 레이놀즈 수에 선형적으로 증가를 하게 된다.

이와 같이 로터 혼합기는 기존 와류 혼합기보다 제작 공정이 다소 복잡하지만 레이놀즈 수 40 이상에서 기존 와류 혼합기보다 혼합효율이 높으며, 능동형 혼합기와 달리 주입에너지만으로 작동이 가능

하다는 장점을 가진다. 마이크로 반응기, 마이크로 열교환기 등 마이크로 플랜트 구성요소와 통합이 용이하며, 감광유리로 제작이 되었기 때문에 불산 계열을 제외한 대부분의 반응물을 반응시킬 수 있을 것으로 판단된다. 레이놀즈 수 200 이상에서 로터가 회전하기 시작하면 혼합효율이 90%이상이 되며 이때의 유량은 200 ml/h 이상이다. 따라서 로터 혼합기의 운용 유량은 200 ml/h 이며, 이 구간은 마이크로 플랜트의 운용구간 범위에 든다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A_2007_000_20065_0)

참고문헌

- (1) Ehrfeld, W., 2003, "Electrochemistry and Microsystems," *Electrochimica Acta*, Vol. 48, pp. 2857~2868.
- (2) Dittrich, P. S., Tachikawa, K. and Manz, A., 2006, "Micro Total Analysis Systems. Latest Advancements and Trends," *Analytical Chemistry*, Vol. 78, pp. 3887~3908.
- (3) Manz, A., Graber, N. and Widmer, H. M., 1990, "Miniaturized Total Chemical Analysis Systems: A Novel Concept for Chemical Sensing," *Sensors and Actuators*, pp. 244~248.
- (4) Hasebe, S., 2004, "Design and Operation of Micro-Chemical Plants - Bridging the Gap Between Nano, Micro and Macro Technologies," *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 29, pp. 57~64.
- (5) Jensen, K. F., 2001, "Microreaction Engineering - is Small Better?," *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 293~303.
- (6) Muller, A., Cominos, V., Hessel, V., Horn, B., Schurer, J., Ziogas, A., Jahnisch, K., Hillmann, V., Groszer, V., Jam, K. A., Bazzanella, A., Rinke, G. and Kraut, M., 2005, "Fluidic Bus System for Chemical Process Engineering in the Laboratory and for Small-Scale Production," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 107, pp. 205~214.
- (7) Schönfeld, F., Hessel, V. and Hofmann, C., 2004, "An Optimized Split-and-Recombine Micro-Mixer with Uniform 'Chaotic' Mixing," *Lab on a Chip*, Vol. 4, pp. 65~69.
- (8) Hessel, V., Hardt, S., Löwe, H. and Schönfeld, F., 2003, "Laminar Mixing in Different Interdigital Micromixers: I. Experimental Characterization," *A.I.Ch.E. Journal*, Vol.49, No.3, pp.566~577.
- (9) Lee, J. K., Kim, Y. D., Choe, J. H., and Kwon, S. J.,

- 2006, "A Micro Mixer with Recirculation Zones," *Transactions of the KSME A*, Vol. 30, No. 12, pp. 1642~1648.
- (10) Stroock, A. D., Dertinger, S. K. W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A. and Whitesides, G. M., 2002 "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol. 295, pp. 647~651.
- (11) Lin, C. H., Tsai, C. H. and Fu, L. M., 2005, "A Rapid Three Dimensional Vortex Micromixer Utilizing Self-Rotation Effects Under Low Reynolds Number Conditions," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, pp. 935~943.
- (12) Oddy, M. H., Santiago, J. G. and Mikkelsen, J. C., 2001, "Electrokinetic Instability Micromixing," *Analytical Chemistry*, Vol. 73, pp. 5822~5832.
- (13) Liu, R. H., Yang, J., Pindera, M. Z., Athavale, M. and Grodzinski, P., 2002, "Bubble-Induced Acoustic Micromixing," *Lab on a Chip*, Vol. 2, pp. 151~157.
- (14) Ryu, K. S., Shaikh, K., Goluch, E., Fan, Z. and Liu, C., 2004, "Micro Magnetic Stir-Bar Mixer Integrated with Parylene Microfluidic Channels," *Lab on a Chip*, Vol. 4, pp. 608~613.
- (15) IMM, <http://www.imm-mainz.de>
- (16) Ehrfeld, <http://www.ehrfeld.com>
- (17) Suh, Y. K., 1996, "Analysis of Stirring and Mixing Based on the Theory of Chaos," *Transactions of the KSME*, Vol. 36, No. 4, pp. 338~350.
- (18) Kim, T. G. and Kwon, S. J., 2006, "Design, Fabrication and Testing of a Catalytic Microreactor for Hydrogen Catalytic Microreactor for Hydrogen Production," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp. 1752~1760.
- (19) Feindt, K., Harnisch, A., Zoppig, V., Hulsenberg, D. and Kallenbach, E., 1998, "3D-Structuring of Photosensitive Glasses," *MEMS '98*, pp. 207~210.
- (20) Dietrich, T. R., Ehrfeld, W., Lacher, M. and Kraemer, M., 1996, "Fabrication Technologies for Microsystems Utilizing Photoetchable Glass," *Microelectronic Engineering*, Vol. 30, pp. 497~504.
- (21) Villiermaux, J., Falk, L., Fournier, M. C. and Detrez, C., 1991, "Use of Parallel Competing Reactions to Characterize Micromixing Efficiency," *A.I.Ch.E. Symp. Ser.*, Vol. 88, No. 186, p. 6.
- (22) Ehrfeld, W., Golbig, K., Hessel, V., Lowe, H. and Richter, T., 1999, "Characterization of Mixing in Micromixers by a Test Reaction: Single Mixing Units and Mixer Arrays," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 38, pp. 1075~1082.
- (23) Wang, H., Iovenitti, P., Harvey, E. and Masood, Syed, 2002, "Optimizing Layout of Obstacles for Enhanced Mixing in Microchannels," *Smart Material and Structures*, Vol. 11, pp. 662~667.